悬浮液沉淀柱实验的统一诠释法

胡家骏

提　　要

沉淀柱实验是一个估计沉淀池效率的常用实验。目前，实验数据的分析方法以悬浮颗粒的沉速为基础。因此对不粘颗粒悬浮液和粘性颗粒悬浮液采用的诠释方法是不同的。但是，沉淀柱可以直接模拟理论沉淀池；所以可以不通过沉速分析，直接依据浓度数据来估计沉淀效率。这一方法可以用于任何悬浮液，与悬浮颗粒的性质无关。

引　　言

沉淀柱实验是设计沉淀池的一个依据。这一实验是 Camp[1] 根据沉速不变的不粘颗粒在平流沉淀池中的沉降理论提出来的。他用沉速百分率（悬浮液中小于某沉速的颗粒占全部颗粒的百分率）曲线来表达实验结果，借以估计不同溢流率（Q/A，Q 是流量，A 是沉淀池平面投影的面积）下的理论沉降效率（e）。后来，Eckenfelder 和 O'Connor[2,3] 把沉降柱实验应用于粘性颗粒悬浮液，用等浓或等效曲线表达实验结果，沿用沉速概念，估算一定沉降时间（t）和一定沉降深度（h）下的理论沉淀效率。这两个方法问世以来都得到广泛的引用[4,5,6]。

本文跳出沉速概念，提出一个比较简单而通用于两类沉淀的诠释法。

沉降柱实验

沉降柱构造和实验程序基本上已经标准化[1,7]，是大家熟悉的，不再赘述。

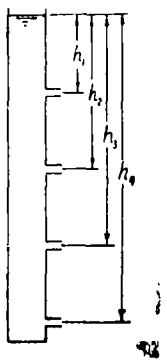


图 1　沉降柱

试样沉降过程中测得的各取样点的悬浮固体 x（毫克/升）可填进空白表格，如表 1 所示。浓度单位可改用百分率 p 表示，$p=\frac{x}{x_0}\times 100$，$x_0$ 为起始浓度，各点相同。表 1 化为表

取样点的悬浮固体（毫克/升）　　表 1

取样点		取样时间（分钟）				
编号	深度（米）	$t_0=0$	$t_1=\Delta t$	$t_2=2\Delta t$	$t_3=3\Delta t$	$t_4=4\Delta t$
1	$h_1=\Delta h$	x_0	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
2	$h_2=2\Delta h$	x_0	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}
3	$h_3=3\Delta h$	x_0	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}
4	$h_4=4\Delta h$	x_0	x_{41}	x_{42}	x_{43}	x_{44}

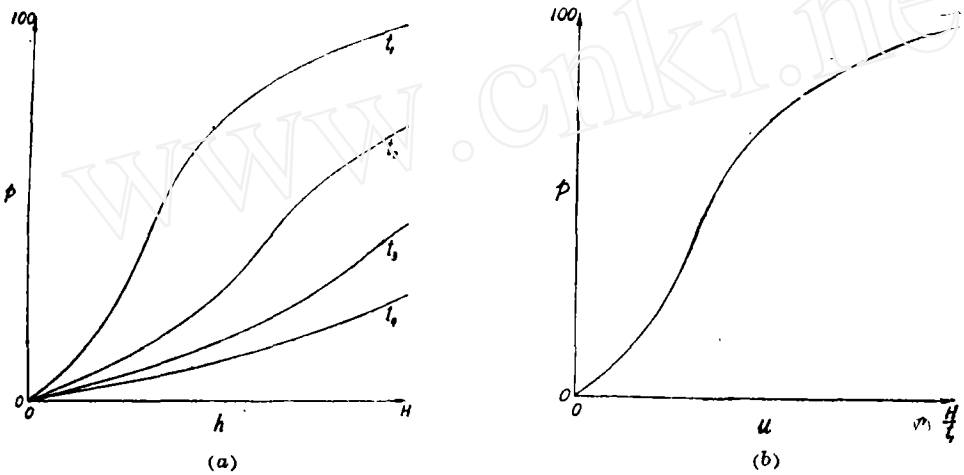
本文于 81 年 6 月 28 日收到。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2。表2数据可用图2(*a*)表示。

取样点的悬浮固体(%)　　表2

取样点深度(米)	取样时间(分钟)				
	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
h_1	100	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}
h_2	100	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{24}
h_3	100	p_{31}	p_{32}	p_{33}	p_{34}
h_4	100	p_{41}	p_{42}	p_{43}	p_{44}



(*a*)　　(*b*)

图2 沉降性能曲线

对不粘颗粒悬浮液，图2(*a*)可用另一方式表示。横轴从深度改为沉速 u，横坐标单位从 h 改为 h/t_1，图2(*a*)中的 h-p-t_1 曲线将保持原形不变，而其他3条曲线将靠上 h-p-t_1 线（如果横坐标单位改为 h/t_3，则4条线将集合到 h-p-t_3 线上）。所得曲线即Camp提出的 u-p 特性曲线，见图2(*b*)。

基本概念

关于悬浮液沉降过程的理论分析是Hazen[8]开始的(1940)。Hazen, Camp和Eckenfelder与O′Connor都采用了一条基本假设：沉降到池底上的颗粒不再进入水中，尚未沉到池底的颗粒随水流出池子。在这条假设的基础上，他们分析不同沉速的颗粒从水中分离的情况，借以估算沉淀效率。沉降柱实验是用来测定悬浮液中颗粒的沉速情况的。在沉降过程中，不粘颗粒的沉速保持不变，而粘性颗粒则因相互粘合而沉速不断增大。由于沉速情况不同，用沉降柱实验数据估算两类不同悬浮液的沉淀效率的方法也就不会相同。对片流型*平流沉淀池，Camp和Eckenfelder与O′Connor分别提出了他们的方法。

但是，片流型平流沉淀池是可以用沉降柱模拟的。因此，可以直接分析沉降柱的沉淀效

* 片流型水池的条件是：(1)同时(Δt)入池的进水均匀分布在池子的整个横断面上，成为一个片状单位。(2)在通过池子时，每一单元中的物质不同前、后单元相互渗透或混和，即每一片状单元始终保持独立状态。显然，这种理论型水池的工作情况可以用分批运行的实验来模拟，也就是说，分批运行实验所得结果可以作为片流型水池的运行结果。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

率来估计平流沉淀池效率，而无需通过沉速分析，因而也不涉及悬浮液的性质。

诠 释 方 法

根据沉降柱实验数据（表1、表2），可以求得澄清悬浮液的平均悬浮固体 $\bar{x}$，进而求得沉降柱的沉淀效率 e。

$$\bar{x}=\frac{1}{h}\int_0^h x\,dh$$

令

$$\bar{p}=\frac{\bar{x}}{x_0}\times 100$$

则

$$\bar{p}=\frac{1}{h}\int_0^h 100\frac{x}{x_0}dh=\frac{1}{h}\int_0^h p\,dh$$

故

$$e(\%)=100-\bar{p}=100-\frac{1}{h}\int_0^h p\,dh$$

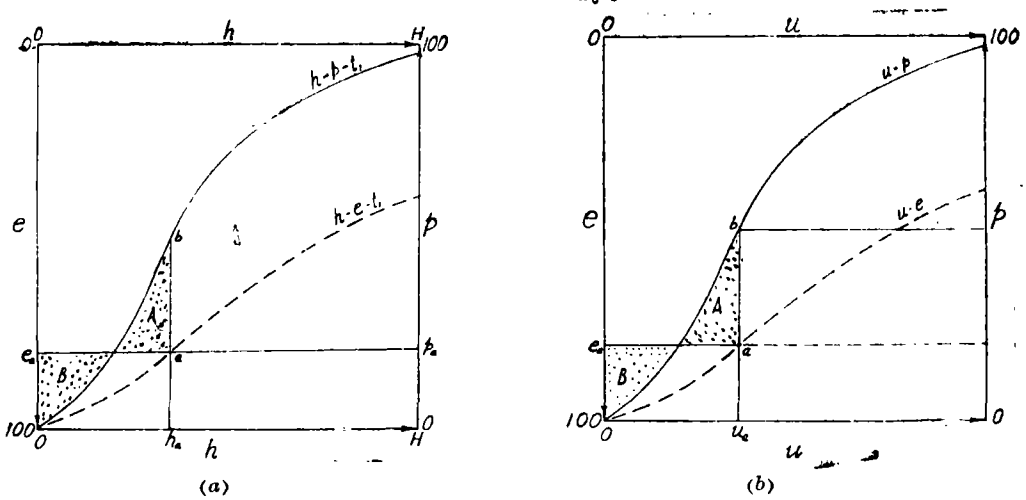
式中 t 是 h 的函数，函数的图形即图2（a）中的曲线。

显然，沉降柱沉淀效率 e 同时受沉淀（逗留）时间和自己深度的控制。在一定的沉淀时间下，$p=f(h)$。在求 e 时，无需推导这个函数，可以直接采用图解法，如图3(a)所示。

以图3(a)中的 a 点为例，说明当 t 为 t_1、h 为 h_a 时，e_a 的图解法。作与 p 轴平行的直线 bh_a，它与 h 轴和 h-p-t_1 曲线相交于 h_a 和 b 点。作与 h 轴平行的直线 e_ap_a，它与 e 轴、直线 bh_a 和 p 轴相交于 e_a、a 和 p_a 点，使面积 A 和 B 相等。这样面积 ah_aOe_a 等于 $\int_0^{h_a} pdh$，而 ah_a 等于 $\frac{1}{h_a}\int_0^{h_a} pdh$，也就是 Op_a 等于 $\bar{p}_a$；而 $O'e_a=e_a=100-\bar{p}_a$，就是与 t_1、h_a 相应的沉降柱沉淀效率。故 a 点是 h-e 曲线上的一点。采用这一方法可以绘出与 h-p-t_1 曲线相应的 h-e-t_1 曲线。

对不粘颗粒悬浮液，也可从图2(b)中 u-p 曲线推求 u-e 曲线，方法与从 h-p-t 曲线求 h-e-t 曲线相同，依据的公式如下：

$$e(\%)=100-p+\frac{1}{u_0}\int u\,dp$$



(a)　　(b)

图 3　与 t_1 相应的 h-e 曲线和 u-e 曲线

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由于图 2(*b*) 中的 u-p 曲线和图 2(*a*) 中的 h-p-t_1 曲线相同，求得的 u-e 曲线和 h-e-t_1 曲线必然相同。这反映 Camp 和本文所依据的基本概念虽有所不同，但得到的结果是相同的。

讨　　论

图 2(*a*) 中有 4 条 h-p-t 曲线，与此相应，可以得到 4 条 h-e-t 曲线，见图 4。当 e 值定为 E 时，可从图 4 上读得 4 组 h-t 值，可在坐标纸上标绘得 t-h 曲线（图 5）。如果是不粘颗粒悬浮液，t-h 呈直线，它的坡度等于与 E 相应的溢流率。如果是粘性颗粒悬浮液，t-h 线将是一条向上弯曲的曲线，反映了池深对沉淀效率的影响。

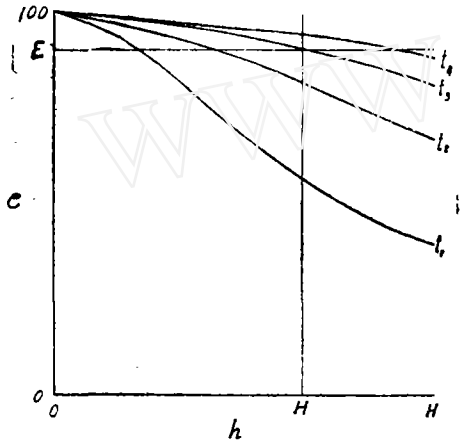


图 4　h-e-t 曲 线 组

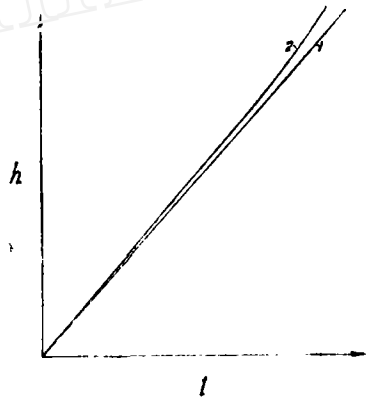


图 5　t-h 曲 线

对不粘颗粒悬浮液，图 4 可用另一方式表示。横轴从深度改为沉速 u，横坐标单位从 h 改为 h/t_1，图 4 中的 h-e-t_1 线将保持原形不变，而其他 3 条曲线将靠上这条线，成为 u-e 曲线。设计沉淀池时，可参考 u-e 曲线确定溢流率 $Q/A(=u_0)$。

在设计时，沉淀池的深度一般是依据构造和水力学要求来选定的，当深度定为 H 后，可从图 4 读得 4 组 t-e 值，并可绘出 t-e 曲线（图 6）。参考 t-e 线，可以选定 t 值，并读得理论沉淀效率。H 与 t 的比值等于沉定池的溢流率；如果 H 的单位是米，t 的单位是小时，那么溢流率的单位是 米^3/小时/米^2。

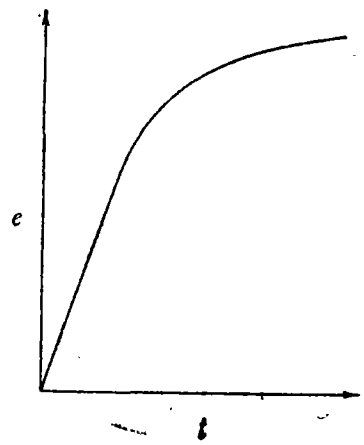


图 6　t-e 曲 线

沉降柱实验与活性污泥法二次沉淀池

活性污泥法二次沉淀池存在异重流，因此严格的说，即使在理论上也不可以假设它为片流型。但是，通过构造设计和池深校正，也许可以把它作为片流型，用沉降柱来模拟。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

柱的高度等于池的校正深度。二次沉淀池的特点是它既起澄清作用，又起浓缩作用；上面有溢流，是出水，下面有底流，是回流污泥与剩余污泥。混合液在沉降柱中沉降 t 小时后的上层液模拟池的出水，下层污泥模拟池的出流污泥（参看图7）。下层污泥体积（Ah_s，A 是柱的横断面面积）模拟池的浓缩区容积（$t(r+W)Q$，Q 是废水流量，r 是回流比，W 是剩余比——剩余污泥流量与废水流量之比，由活性污泥过程的特性确定）。上层液体积（$Ah-Ah_s$）模拟池的澄清区容积（$t(1-W)Q$）。这样，通过沉降柱实验，读出沉降柱中污泥高度 h_s 后，即可估算出流污泥的悬浮固体 x_s 和回流污泥比 r。

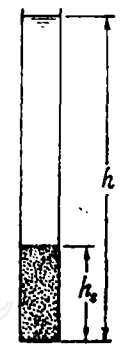


图 7　混合液沉降柱

因　　$$Ah_s x_s = Ahx_0$$

故　　$$x_s = \frac{h}{h_s}x_0$$

这里，x_s 是混合液的悬浮固体。

又因　　$$\frac{Ah_s}{A(h-h_s)} = \frac{t(r+W)Q}{t(1-W)Q} = \frac{r+W}{1-W}$$

故　　$$r = \frac{h_s(1-W)}{h-h_s} - W$$

结　　语

本文以沉降柱模拟片流型沉淀池，提出了通用于任何稀悬浮液的沉降柱实验诠释法，借以估计平流沉淀池的理论效率。本文还认为沉降柱实验也许可用于活性污泥法二次沉淀池的设计。

参　考　文　献

[1] Camp, T. R., "Sedimentation and the Design of Settling Tanks," Transaction, ASCE, Vol. 111 (1964), 905-909

[2] O'Connor, D. J., and Eckenfelder, W. W., Jr., Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, Vol. II, J. McCabe and W. W. Eckenfelder, Jr., eds., Reinhold Publishing Corp., 1961, 173-181

[3] Eckenfelder, W. W., and O'Connor, D. J., Biological Waste Treatment, Pergamen Press, 1961, 158-161

[4] Rich, L. G., Unit Operation of Sanitary Engineering, John Wiley and Sons, Inc., 1961, 88-93

[5] Clark, J. W., Viessman, W., Jr., and Hammer, M. J., Water Supply and Pollution Control, 3rd ed., International Textbook Co., 1977, 355-359

[6] Metcalf and Eddy, Inc., Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse, 2nd ed., McGraw-Hill, Inc., 1979, 204-209

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[7] Zanoni, A. E., and Blomquist, M. W., "Column Settling Tests for Flocculant Suspensions," Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE., Vol. 101 (1975), EE3, 316-318

[8] Hazen, A., "On Sedimentation," Transaction, ASCE, Vol. 53 (1904), 45

A Unified Method of Analysis for the Column Settling Test

Hu Jiajun

Abstract

Column settling test is currently used to do settling analysis for dilute suspensions. Theoretical settling efficiency of horizontal sedimentation tanks can be estimated. The method of analysis was first suggested by Camp for discrete-particle suspensions and then extended by Eckenfelder and O'Connor for flocculant suspensions. Their analyses are both based on settling velocities of suspended particles.

Discrete particles settle in constant velocities and flocculant particales in increasing velocities. So the method of analysis is somewhat different for the two types of sedimentation.

But settling column can simulate plug flow or ideal horizontal sedimentation tank directly. By analysing the column settling test data, the average concentration of the settled suspension can be obtained and then the settling efficiency can be estimated easily. While this method of analysis is applicable to both types of sedimentatian, for flocculant suspensions it is much simpler than the current method.

It might be also applied to designing secondary sedimentation tank of the activated sludge process. It seems to be possible to estimate underflow concentration and sludge retun ratio for given tank depth and detention time.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net